

塔中北坡走滑断裂成因机理与油气成藏

宁飞^{1,2,3}, 金之钧^{1,3}, 张仲培³, 云金表^{1,2,3}, 张继标³

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院构造与沉积储层实验室, 北京 100083; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:塔中北坡发育一系列NE向走滑断裂。为了揭示走滑断裂形成机理及其对油气成藏的影响,在对走滑断裂几何样式详细解析的基础上,运用物理模拟方法对塔中北坡NE向走滑断裂的演化过程进行了模拟。结果表明,在单一应力状态下,由于差异推挤和基底剪切共同作用,走滑断裂在平面和剖面上发育了不同的样式,沿断裂走向具有分段性特征。结合构造背景分析,认为塔中北坡走滑断裂成因机理受控于两种因素,即由于塔中I号断裂带存在分段性,在加里东末期—海西早期北东向应力场作用下,使塔中隆起对北坡形成强度差异的推挤作用;其次,塔中北坡NE向基底断裂活动造成基底剪切作用,拖动上覆上奥陶统、志留系、泥盆系在左行力偶下运动。NE向走滑断裂的存在对塔中北坡油气成藏具有一定贡献:一方面走滑断裂会诱导高角度构造裂缝发育,从而沟通了储集空间,另一方面,走滑断裂的活动为塔中北坡多层系立体成藏提供了便利。

关键词:分段性;断裂样式;油气成藏;走滑断裂;塔中地区;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Mechanism of strike-slip faulting and hydrocarbon accumulation in northern slope of Tazhong area

Ning Fei^{1,2,3}, Jin Zhijun^{1,3}, Zhang Zhongpei³, Yun Jinbiao^{1,2,3}, Zhang Jibiao³

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China; 2. Laboratory of Structural and Sedimentological Reservoir Geology, Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: A series of NE trending strike-slip faults developed in northern sloped of Tazhong area. In order to unravel the forming mechanism and its implication on hydrocarbon accumulation of strike-slip faults, detailed analysis upon geometric styles of strike-slip faults was performed, and the evolutional process of NE trending slip-faults in northern Tazhong area was simulated by using physical analogue model method. The results show that development of different planar and sectional structural styles of strike-slip faults is induced by differential pushing and basement shear effect under simple contractional stress field. Segmentation of characteristics is also observed along faults trending. It is concluded by physical analogue results integrated with structural background analysis that the forming mechanism of strike-slip faults in northern slope of Tazhong area was controlled by two factors. Firstly, the segmentation of Tazhong I fault gave the northern slope of Tazhong area a differential pushing stress in NE direction at the late Caledonian-early Hercynian. Secondly, NE trending basement faults activity in northern Tazhong area resulted in basement shear effect, which drag overlying upper Ordovician, Silurian, Devonian strata sinistrally. The existence of NE trending strike-slip faults contribute to hydrocarbon accumulation in northern slope of Tazhong area. On the one hand, high-angle structural faults development induced by strike-slip faults connects reservoir sections. On the other hand, faulting of strike-slip facilitates multi-layers hydrocarbon accumulation in northern slope of Tazhong area.

Key words: segmentation, fault style, hydrocarbon accumulation, strike-slip fault, Tazhong area, Tarim Basin

大型走滑断裂多是由于板块之间斜向汇聚或碰撞作用形成的,而在陆内构造变形中,走滑断裂常发育在

收稿日期:2017-08-26;修订日期:2017-10-23。

第一作者简介:宁飞(1981—),男,博士、高级工程师,盆地分析与油区构造解析。E-mail:ningfei_syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41602158);中石化科技部项目(P15089);国家基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB412800);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA14010402);国家科技重大专项(2017ZX05005001-001)。

盆地边缘及边界构造带^[1-2]。叠合盆地多经历了多期演化过程和复杂的构造应力场^[3-4],在盆地内部,由于扭动应力场作用,走滑断裂也普遍发育。由于走滑断裂倾向通常较陡,深层普遍切割基底,为烃类长距离垂向运移提供了良好通道。此外,无论是张扭作用还是压扭作用形成的走滑断裂,在发育过程中均会对断裂两盘围岩造成破坏,从而在断裂周围发育一系列走滑断裂所诱导的裂缝^[5],在一定程度上又改善了储层的质量,对油气成藏具有积极的贡献。早在2003年,随着在塔中隆起TZ16-TZ31井区获得了高品质的三维地震资料,首次揭示了塔中地区存在一定规模的走滑断裂^[6],并且走滑断裂可以一直向北延伸到顺托果勒低隆起,走滑断裂还对塔中隆起起到了东西分段的作用。近年来,塔中北坡顺南4井和顺南5井在奥陶系走滑断裂周围获得了高产气流,展示了走滑断裂带良好的勘探前景。国内许多学者对塔中北坡NE向走滑断裂的几何学特征^[6-10]、运动学过程^[8,11]及对油气成藏的意义^[7-12]都做过深入探讨,但并没有对NE向走滑断裂的成因机理做过有意义的解释,这在一定程度上制约了断裂控储和断裂控藏的认识。不同成因机制

的走滑断裂对储层改造的贡献有较大差异,因此,揭示走滑断裂的成因机理对进一步寻找优质储层、提高勘探可靠性以及降低勘探成本具有一定的实际意义。

1 区域地质概况

塔中北坡指的是塔里木盆地塔中隆起北部边缘断裂塔中I号断裂带以北的斜坡,包括顺托果勒低隆起南部以及古城墟隆起大部分(图1)。构造整体上为一个倾向NW的斜坡,南部以塔中隆起北部边界塔中I号断裂带为界。中-下奥陶统顶部存在明显的角度不整合面,志留系自塔中北坡坳陷区向东南部构造高部位上超,界面之下可见上奥陶统的顶削特点。走滑断裂平面上在顺托果勒低隆起范围内呈NE走向,往东在顺南缓坡内则发育NE向和NEE向两组走滑断裂,再往东到了古城墟隆起,走滑断裂走向则多以NEE向为主。南部自塔中隆起构造高点塔中II号断裂带开始,向北切穿塔中I号断裂带,继续向北呈线性延伸。断裂规模不同,多数走滑断裂走向上构造样式存在较大差异。

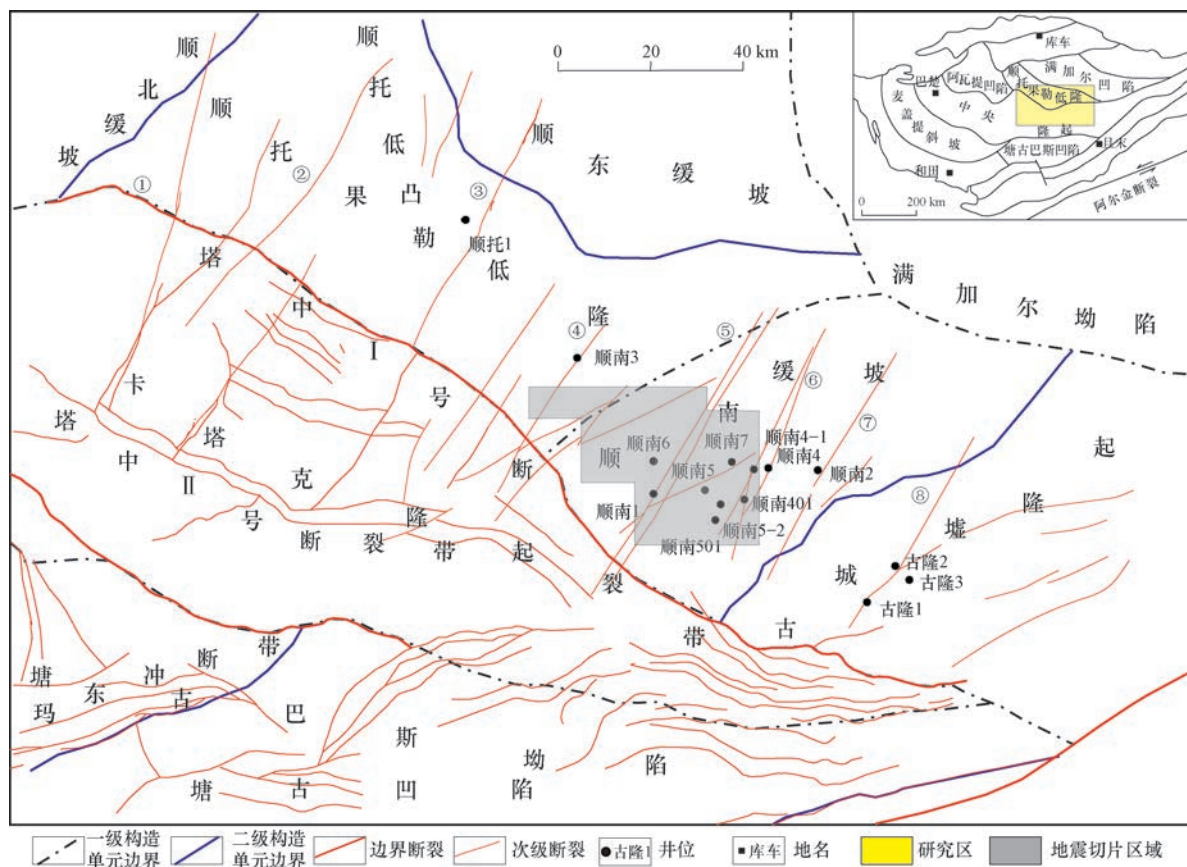


图1 塔中北斜坡构造纲要

Fig.1 Structure outline of northern slope of Tazhong area

阿满2井断裂;②顺西2井断裂;③顺托1井断裂;④顺南3井断裂;⑤顺南1井断裂;⑥顺南4井断裂;⑦顺南2井断裂;⑧古隆1井断裂

受加里东早期运动的影响,塔中地区处于碳酸盐岩台地沉积背景,加里东中期 I 幕运动使盆地内部发生了强烈的构造变形^[13-14],此时塔中北坡处于加里东中古隆起斜坡部位。奥陶系在塔中隆起区和塔中北坡存在差异,台地相区发育良里塔格组之上大套碎屑岩地层为桑坦木组,而在塔中北坡良里塔格组沉积期相变为泥岩(表 1),恰尔巴克组之上大套碎屑岩沉积地层为却尔却克组,岩性为巨厚灰色-深灰色泥岩、粉砂质泥岩、灰质泥岩夹灰色粉砂岩和褐色泥灰岩。一系列 NE 走向的走滑断裂将塔中北坡下古生界切割成条块状。

2 断裂几何学特征

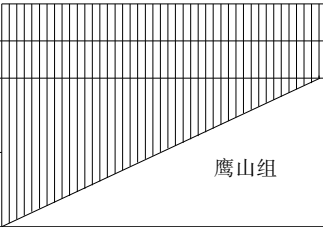
平面上,塔中北坡自西向东发育 8 条 NE 走向的走滑断裂,一系列 NE 走向的走滑断裂呈近平行展布。断裂规模和级别存在较大差异,规模最大的走滑断裂延伸大于 20 km,如顺托 1 井断裂带。单条走滑断裂在平面上也存在多种样式(图 2),沿层相干体切片上走滑断裂展现出了简单平移、雁列组合以及帚状断裂的次级断裂组合。简单平移样式在塔中北坡走滑断裂分布较广泛,断裂在平面上没有分叉,表现为单一的断裂,往深层多切割基底,此类断裂宽度较窄,对周围岩层变形影响较小。雁列组合样式是走滑断裂常见的平面识别标志,在塔中北坡主要走滑断裂上都有所体现。该类断裂是在走滑断裂两盘活动时,围岩受到了扭动应力场的作用,在主走滑断裂两侧呈透入性分布。雁

列组合对走滑断裂两侧岩层影响较大,对储层具有很好的改造作用。同雁列组合类似,帚状断裂也会诱导裂缝发育,因此也会对储层改造具有积极意义。不同的是,帚状断裂多发育在走滑断裂末端,且仅在走滑断裂活动盘发育。

剖面上,走滑断裂呈现 3 种构造样式,根据其发育的应力环境及剖面样式,分为紧闭平移型、压扭上拱型和拉分下凹型 3 类(图 3)。3 种类型的走滑断裂都呈现应变相对较小的特点,表现为断层倾角较陡,断距小,且纵向上切割地层较厚的特点。但是单条走滑断层在走向上存在分段性,同一条走滑断裂在断裂连接处与叠加区,应变较大^[2]。在拉分叠加区,表现为正断层或小型张破裂发育,在平移段则以断层两盘相对滑动为主;在挤压连接处,表现为局部压扭、逆冲或小型剪切破裂密集发育;而在断裂尾端,则经常发育有向外发散的呈帚状的断裂三角区,破裂相对发育。

顺南 2 井断裂就存在典型的断裂分段性特征,断层主变形带呈北偏东 30°走向(图 1)。在地震剖面上,可见 T₀⁰ 界面(上泥盆统底面)以下有明显的近垂直断裂发育,向下切穿基底。剖面样式沿断裂走向上也表现各异(图 4),平面上具有明显的分段性。在三维区范围内,断裂自 SW 向 NE 依次表现为弱拉分、平移、弱压扭、平移、较强拉分的特征。以 T₇⁴ 界面(上奥陶统底面)为例,其最大拉分宽度在顺南 2 井(剖面 4)附近,拉分宽度超过 1 km;最大垂直断距也在该段,为 66 ms

表 1 塔中地区奥陶系划分
Table 1 Stratigraphic sections of the Ordovician in Tazhong area

			地层		主要岩性	关键构造运动	
系	统	阶	隆起区	北斜坡			
奥陶系	上统	艾家山阶	桑塔木组		泥岩	加里东运动中期Ⅱ幕	
			良里塔格组	却尔却克组	泥晶灰岩		
					颗粒灰岩		
					泥晶灰岩		
					泥晶灰岩		
	泥晶灰岩						
	中统	达瑞威尔阶		恰尔巴克组	褐红色瘤状灰岩	加里东运动中期Ⅰ幕	
		大湾阶		一间房组	颗粒灰岩		
				上段	颗粒灰岩		
					灰岩		
		道保湾阶		鹰山组	下段		灰岩夹云岩
							云岩夹灰岩
					灰岩、云岩		
下统		新厂阶		蓬莱坝组	云岩夹灰岩		加里东运动早期
	云岩						

注:表格中竖线代表地层缺失。

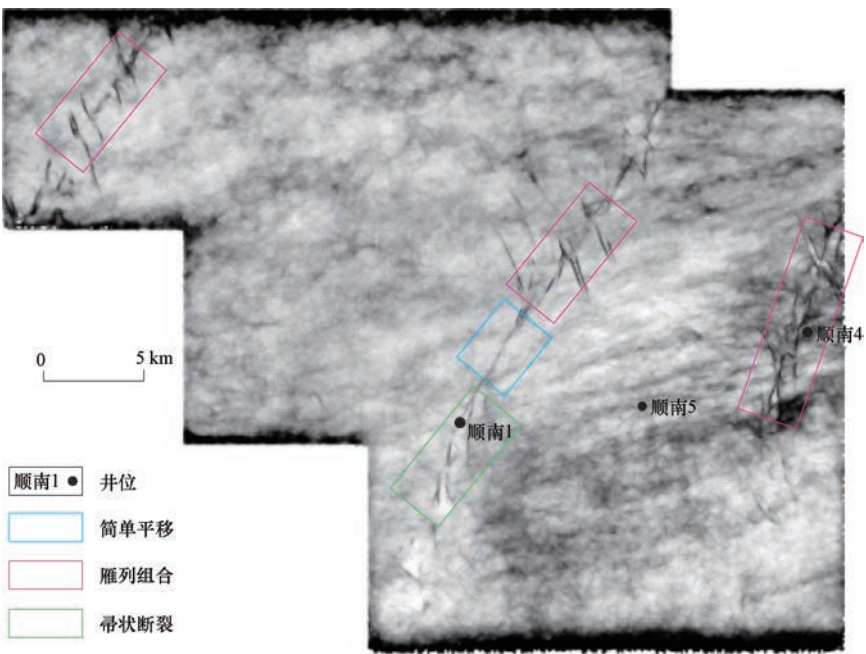


图 2 塔中北斜坡沿上奥陶统顶面层相干体切片及走滑断裂平面样式(切片位置见图 1)
Fig. 2 Coherence slice along the top of upper Ordovician showing planar style of strike-slip faults in northern slope of Tazhong area(see Fig. 1 for the location)

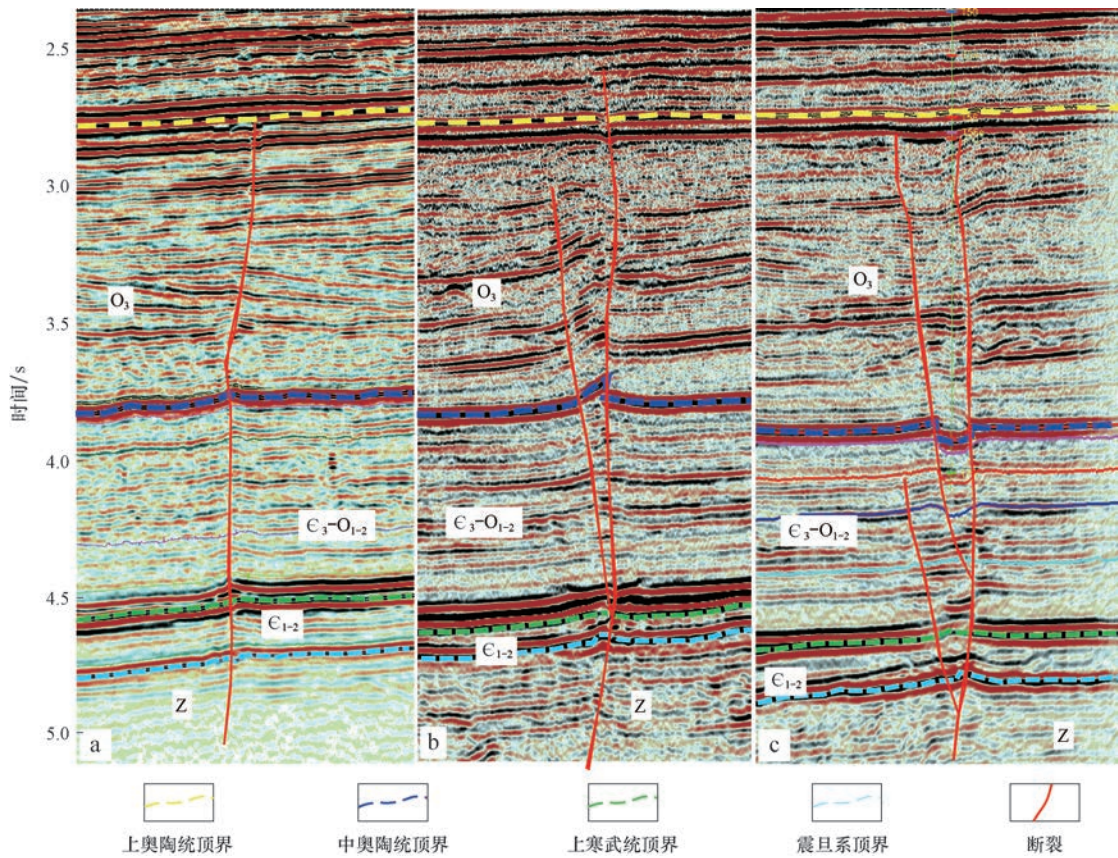


图 3 塔中北斜坡走滑断裂剖面构造样式
Fig. 3 Structural styles of strike-slip faults in northern slope of Tazhong area
a. 紧闭平移样式; b. 压扭上拱样式; c. 拉分下凹样式
Z. 震旦系; E_{1-2} . 中-下寒武统; E_3 . 上寒武统; O_{1-2} . 中-下奥陶统; O_3 . 上奥陶统

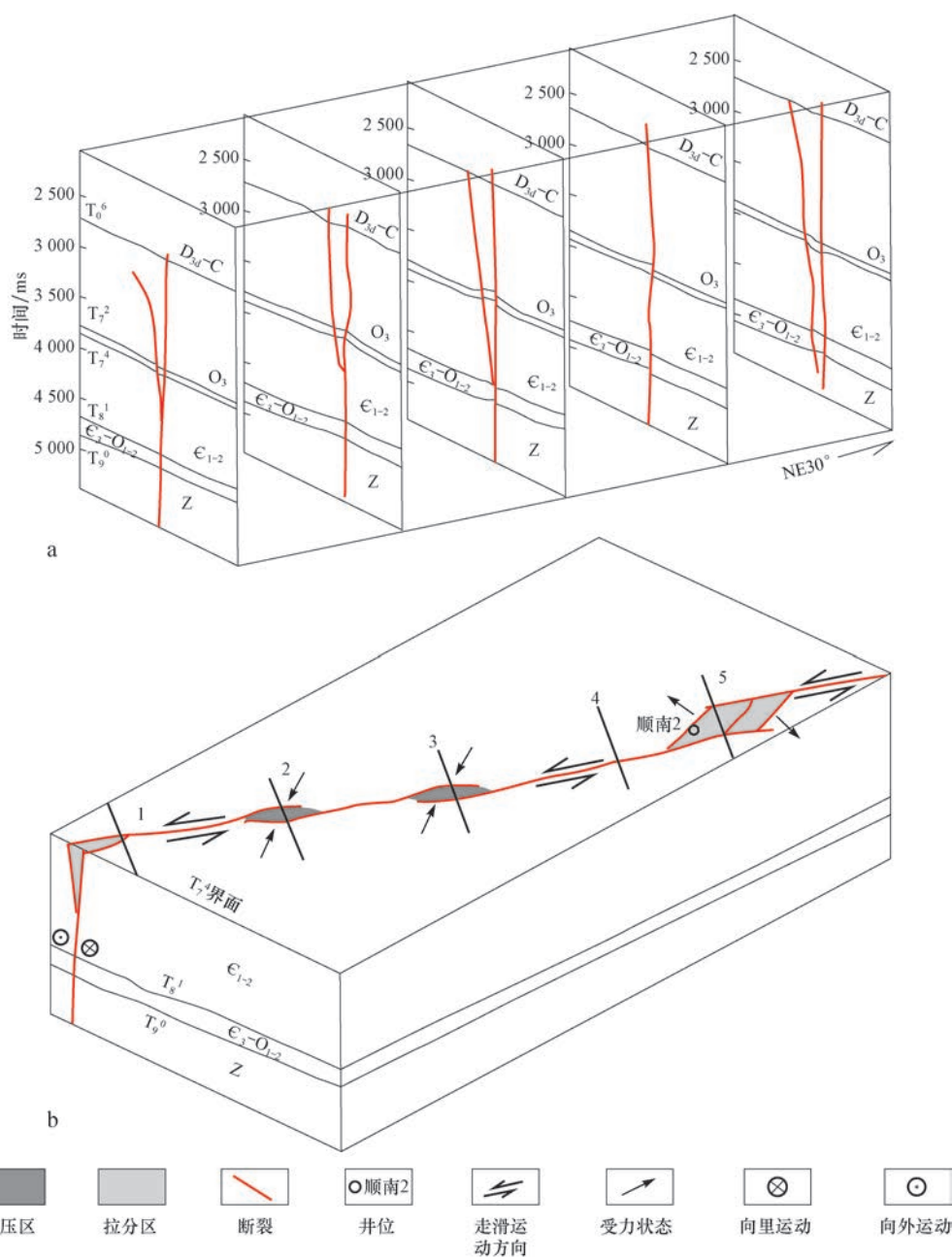


图4 塔中北斜坡顺南2井走滑断裂分段性平面和剖面图

Fig. 4 Planar and section maps of segmentation of well Shunnan 2 strike-slip fault in Tazhong area

a. 分段性剖面图; b. 分段性平面图

Z. 震旦系; ϵ_{1-2} . 中-下寒武统; ϵ_3 . 上寒武统; O_{1-2} . 中-下奥陶统; O_3 . 上奥陶统; D_{3-2} . 下泥盆统东河塘组; C. 石炭系

(图4;表2),在 T_7^0 界面(志留系底面)变形则更为强烈。剖面2和剖面3表现为压扭上拱,但垂直断距与变形影响宽度均小于顺南2井附近的较强拉分段。根据顺南2井走滑断裂诱导的断层展布方向判断,该走滑断裂运动方向为左行滑动。

3 断裂运动学过程

前人对塔中及邻区构造演化研究^[7-8,11],认为中

奥陶世末塔里木盆地碳酸盐岩台地是一次非常重要的抬升时期,也是塔中地区开始隆起形成雏形的重要时期。NW走向的塔中I号断裂带自中奥陶世末开始活动,直到晚奥陶世早期,塔中I号断裂带均为主要的活动断裂。受塔中I号断裂活动的影响,塔中北坡必然受到来自塔中隆起的推挤作用,从现今塔中I号断裂带的走向变化及活动强度的差异分析,其有明显的分段性,且各段在断层活动时,强度不同,对北坡产生的推挤作用力也会有差异,从而可能会形成NE向的协

表 2 塔中北斜坡顺南 2 井断裂拉分距离和垂直断距统计
Table 2 Pull-apart distance and fault throw of well
Shunnan-2 strike-slip fault in Tazhong area

	地震反射界面	拉分宽度/m	垂直断距的 双程时间/ms
剖面 1	T ₇ ⁰	1208	42
	T ₇ ⁴	540	38
	T ₈ ¹	79	35
剖面 2	T ₇ ⁰	463	38
	T ₇ ⁴	202	-36
	T ₈ ¹	12	-22
剖面 3	T ₇ ⁰	-1606	-39
	T ₇ ⁴	-853	-36
	T ₈ ¹	-20	-32
剖面 4	T ₇ ⁰	196	59
	T ₇ ⁴	40	58
	T ₈ ¹	0	36
剖面 5	T ₇ ⁰	1340	140
	T ₇ ⁴	1002	66
	T ₈ ¹	240	30

注:拉分宽度中,负值代表挤压;垂直断距中,负值代表逆断距的双程时间。

调断层。NW 向断裂控制了塔中隆起开始形成时的构造格局,从而使塔中隆起带碳酸盐岩台地由早期的缓坡-镶边缓坡型台地结构演化为礁滩型孤立台地。从图 4 顺南 2 井断裂带剖面样式可以看到,D_{3d}-S/O₃之间存在明显的不整合面。此外,由于在晚奥陶世塔里木盆地南缘北昆仑洋最终关闭,盆地南缘处于持续收缩的挤压构造环境,塔南-塔中地区在晚奥陶世末期发生强烈的冲断挤压,且地震剖面显示 NE 向走滑断裂最大活动断距发生在上奥陶统内(图 3)。以上诸多证据可推断该走滑断裂主要活动时间范围为晚奥陶世持续到晚志留世,为加里东晚期—海西早期运动的结果。

4 成因机理

构造物理模拟方法是研究断裂演化过程与成因机制强有力的手段,并有过诸多成功经验^[1,15-16]。在对塔中北坡走滑断裂几何学分析的基础上,设计了一组物理模拟实验,再现走滑断裂形成的运动学过程,从而明确控制走滑断裂发育的主要因素,对揭示走滑断裂分段性及成因机理做出合理的解释。

4.1 模型设计

根据塔中北坡的构造演化背景以及边界基底条件,设计了图 5 所示实验装置,实验在中国石化勘探开

发研究院构造与沉积储层实验室 3D 物理模拟综合实验仪上进行。实验仪器中,砂箱尺寸为长 55 cm,宽 30 cm,高 40 cm,砂箱一侧固定,另一侧连接马达,以 2.3×10^{-5} m/s 的速度匀速运动,最大挤压位移量为 5.5 cm。实验材料选用粒径为 0.2~0.3 mm 的松散石英砂,其内摩擦角为 29°~32°,内聚力接近零,砂层厚度设定为 5 cm,不同颜色的石英砂只为区分不同地层界线,其物理性质相同。从航磁异常等值线图上可以看到^[14],塔里木盆地中央隆起区东部存在一定规模的 NE 走向的基底断裂。基于此,在模型底部平行放置 3 块聚苯乙烯泡沫,用来模拟基底断裂。移动挡板一侧放置楔形泡沫,可实现在移动板推挤过程中对 3 块基底泡沫逐步施力,从而达到基底左行走滑的运动状态。

4.2 实验现象

从实验中可以看到(图 6),在左行剪切力偶状态下,雁列组合、简单平移和帚状断裂 3 种样式在砂层表面均有体现。随着挤压位移量的增加,断裂两盘错动更加明显,剖面上可以看到发育有压扭上拱、紧闭平移和拉分下凹 3 种样式(图 6)。边界断裂的分段性导致向北差异推挤是 NE 向走滑断层形成的控制因素,NE 向走滑断层左行剪切,形成了雁行断裂。对运动 5.5 cm 后的左行剪切实验模型进行了加水切片,切片位置及剖面样式如图 6。走滑断层在在 B-B'剖面上表现

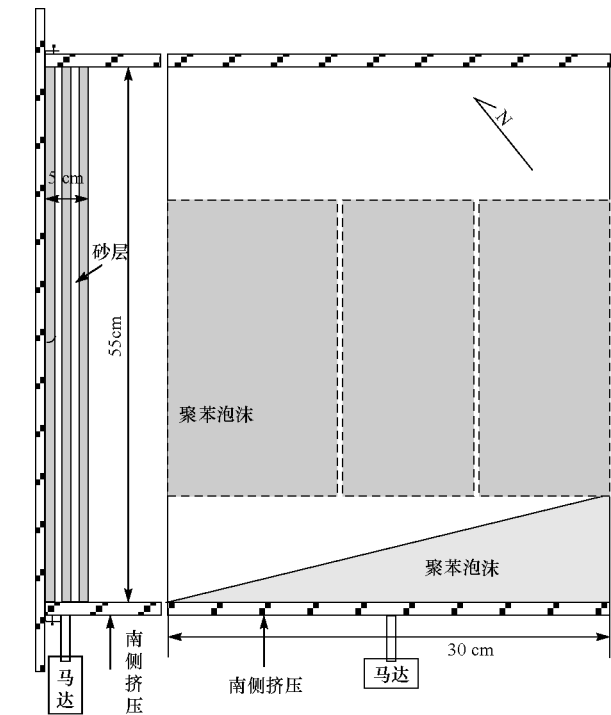


图 5 物理模拟实验装置示意图
Fig. 5 Schematic map of apparatus of physical analogue model

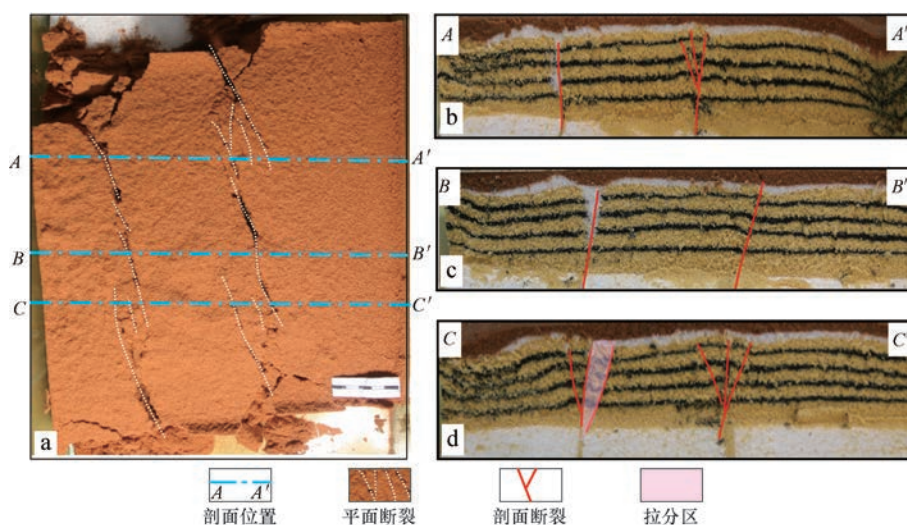


图6 物理模拟实验结果解释

Fig. 6 Interpretation of physical analogue experiment

a. 平面实验结果; b—d. 剖面切片实验结果

为近直立的断层,在 $A-A'$ 剖面上则有半花状构造样式发育,在基底剪切应力影响下,上覆层局部受到剪张作用形成局部构造低点(图6中 $C-C'$ 剖面阴影部分),上覆地层局部地区受到压扭作用,地层上拱形成局部构造,如剖面 $A-A'$ 。

4.3 讨论

通过对塔中北坡断裂几何学样式解析,区域构造演化历史分析结合砂箱物理模拟实验结果,认识到塔中北坡发育一系列 NE 向左行走滑断裂并至少两期活动的控制因素可能与两种地质作用有密切关系。

首先,由于库地洋在中奥陶世俯冲消亡,中昆仑地体与塔里木板块碰撞,使克拉通内挠曲隆升形成塔中前缘隆起带^[17]。塔中隆起大致在加里东中期(主要集中在中奥陶世末)初步发育和形成^[18-20],北部以塔中 I 号断裂带为界,同时也是塔中北坡的南部边界。由于塔中 I 号断裂带存在分段性,致使塔中隆起这一块体对塔中北坡地层形成强度差异的推挤作用。东段明显比中段要强,表现为断距较大,越往西北段,断裂活动强度有明显减小的趋势。因此,差异推挤作用会导致在 I 号断裂带的附近形成垂直于 I 号断裂带走向的 NE 向走滑断层,起到协调作用。

其次,中奥陶世末期,昆仑洋沿着库地-奥依塔格断裂向南俯冲,逐渐消减于西昆仑早古生代火山岛弧之下,受其影响,塔中地区处于北东-南西向的挤压应力场之中并逐渐抬升,而其南北两侧逐渐沉降,成为塘古孜巴斯坳陷和塔东-满加尔坳陷。由于是长期、持续性的挤压过程,塔中隆起 NW 向的断裂如塔中 II 号

断裂带等再次压扭走滑活动,加里东末-海西早期(S_3 末- D_3),塔中隆起及邻区的基底走滑作用导致塔中隆起北部整体形成旋扭应力场,带动基底断裂和早期发育在中-下奥陶统及以下碳酸盐岩地层 NE 向协调断层再次活动,并使 NE 向的协调断层由塔中 I 号断裂带附近向北部(满加尔坳陷方向)扩展。发育在下部强能干层(主要是结晶基底+碳酸盐岩)的 NE 向基底断裂在 NE 向小位移走滑剪切的同时,拖动上覆能干性较差的新沉积的上奥陶统-志留系-泥盆系(主要为砂泥岩)运动,形成了一系列 NE 走向的次级破裂和小规模走滑拉分构造。这些拉分构造主要发育在 T_4^1 界面以上,少量发育到中下奥陶统内部,物理模拟揭示了单一应力状态下走滑断裂可能发育不同的断裂样式,基底剪切断裂活动是 NE 向走滑断裂形成至关重要的因素。

5 油气地质意义

走滑断裂在活动过程中对其两侧围岩产生影响,从物理模拟试验所揭示的走滑断裂成因机制来看,同一次构造运动导致的断裂发育沿走向可能表现为不同的构造样式,且对裂缝性储层改造程度不同。走滑拉分段和压扭上拱段对围岩的影响范围较大,这两种剖面样式所诱导的裂缝产状多以高角度为主,规模相对大。通过对塔中北坡取心井奥陶系鹰山组岩心观察,走滑断列所诱导的裂缝发育具有明显的规律,受局部构造应力场控制的构造缝在塔中北坡普遍发育,裂缝走向以 NE 或 NEE 向为主,与走滑断裂走向基本一致。

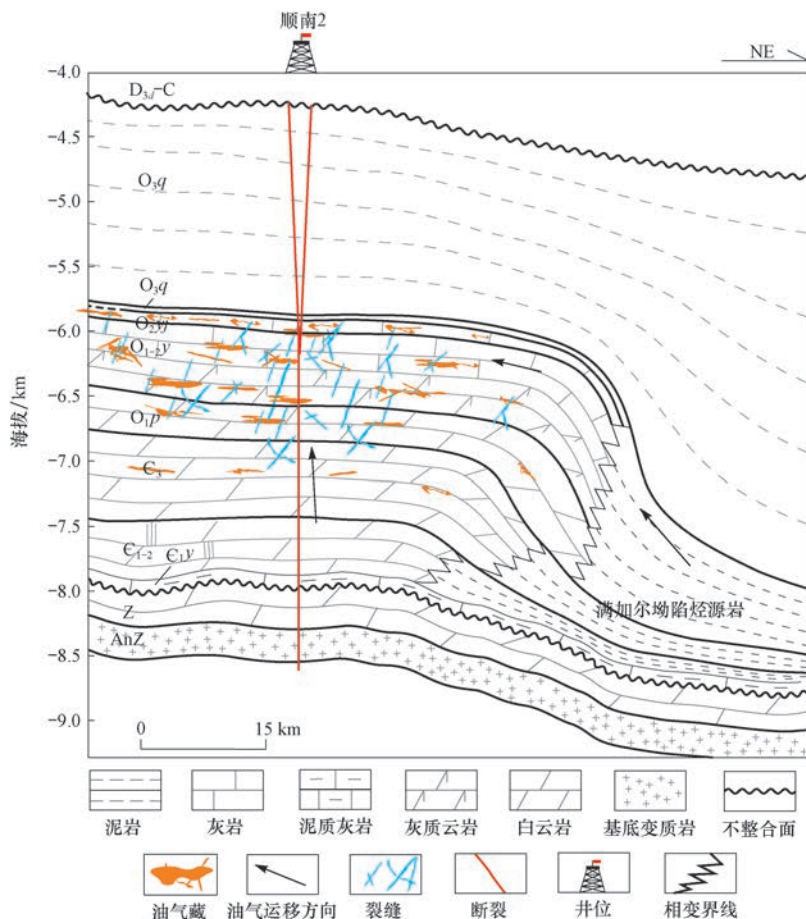


图7 塔中北坡油气成藏模式

Fig.7 Schematic plot of hydrocarbon accumulation model in northern slope of Tazhong area

AnZ. 前震旦系;Z. 震旦系; C_{1-2} . 下寒武统玉尔吐斯组; C_{1-2} . 中-下寒武统; C_3 . 上寒武统; O_{1p} . 下奥陶统蓬莱坝组;
 O_{1-2y} . 中-下奥陶统鹰山组; O_{2y} . 中奥陶统一间房组; O_{3q} . 上奥陶统恰尔巴克组; D_3d . 下泥盆统东河塘组;C. 石炭系

通过岩心资料统计分析,裂缝倾向普遍为高角度构造裂缝。裂缝和走滑断裂构成了塔中北坡立体的输导体体系,得深部流体向上运移提供了便利。从岩心上可以看到,多数岩心被裂缝切穿,且常见多块岩心发育同一条裂缝,可明确识别裂缝长度大于1 m。裂缝的长度和宽度影响着裂缝的储集性和渗流能力,裂缝越长越宽便更容易储集油气,并将各储集空间串联起来,从而形成立体的裂缝渗流网络,构成良好的油气储集空间及运移通道(图7)。

塔中北坡从加里东早期的碳酸盐岩台地演变到加里东中晚期—海西早期的构造—沉积复合斜坡,是满加尔坳陷优质烃源岩向高部位运移的必经之路,优质的裂缝渗流网络为运移提供了便利。中、新生代塔中北坡又经历多期整体构造变动,后期改造弱。除此以外,上奥陶统却尔却克组泥岩在塔中北坡厚度大,是优质的盖层,且封闭能力形成早,因此塔中北坡具有优越的油气保存条件。垂直走滑断裂在晚期的活动可能为油气在古生界多个层系的成藏和调整聚集提供了条件

(图7)。顺南地区在奥陶系鹰山组、一间房组、志留系和二叠系均发现油气层,反映了塔中北坡存在多层油气成藏的现象。

6 结论

1) 塔中北坡走滑断裂在平面上具有简单平移、雁列组合以及帚状断裂样式,剖面上根据走滑断裂形成的应力状态可分为拉分下凹、压扭上拱和紧闭平移3种构造样式,反映了走滑断裂丰富的几何学特征。

2) 物理模拟揭示了塔中北坡走滑断裂的成因机理,即由于塔中I号断裂带的分段性导致的差异推挤以及基底断裂活动造成的基底剪切共同作用下,在单一左行力偶状态下形成的。

3) NE走滑断裂分段性对裂缝性储层改造具有差异性,所诱导的裂缝以高角度构造缝为主,一方面沟通了油气储集空间,另一方面,走滑断裂的活动还为塔中北坡多层系立体成藏提供了便利。

参考文献

- [1] McClay K R, Dooley T. Analogue models of pull-apart basins. [J]. *Geology*, 1995, 23(8): 711–714.
- [2] Rocchi S, Storti F, Vincenzo G D, et al. Intraplate strike-slip tectonics as an alternative to mantle plume activity for the Cenozoic rift magmatism in the Ross Sea region, Antarctica [J]. *Geological Society London Special Publications*, 2003, 210(1): 145–158.
- [3] 金之钧. 中国典型叠合盆地及其油气成藏研究新进展(之一)——叠合盆地划分与研究方法[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 553–562.
Jin ZhiJun. New advancement in research of China's typical superimposed basins and reservoiring (Part I): Classification and research methods of superimposed basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 553–562.
- [4] 汤良杰, 黄太柱, 金文正, 等. 叠合盆地差异构造变形与油气聚集[J]. *地质前缘(中国地质大学(北京); 北京大学)*, 2009, 16(4): 013–022.
Tang Liangjie, Huang Taizhu, Jin Wenzheng, et al. Differential deformation and hydrocarbon accumulation in the superimposed basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 13–22.
- [5] Peacock D. C. P. Displacements and segment linkage in strike-slip fault zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(9): 1025–1035.
- [6] 李明杰, 胡少华, 王庆果, 等. 塔中地区走滑断裂体系的发现及其地质意义[J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(1): 116–121.
Li Mingjie, Hu Shaohua, Wang Qingguo, et al. Discovery of strike-slip fault system in Tazhong area and geologic meaning [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2006, 41(1): 116–121.
- [7] 张承泽, 于红枫, 张海祖, 等. 塔中地区走滑断裂特征、成因及地质意义[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(5): 22–26, 14.
Zhang Chengze, Yu Hongfeng, Zhang Haizu, et al. Characteristic, genesis and geologic meaning of strike-slip fault system in Tazhong area [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2008, 30(5): 22–26, 14.
- [8] 杨圣彬, 刘军, 李慧莉, 等. 塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(6): 797–802.
Yang Shengbin, Liu Jun, Li Huili, et al. Characteristics of the NE-trending strike-slip fault system and its control on oil accumulation in north peri-cline area of the Tazhong paleouplift [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(6): 797–802.
- [9] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 257–267.
Huang Taizhu. Structural interpretation and petroleum exploration targets in northern slope of middle Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 257–267.
- [10] 甄素静, 汤良杰, 李宗杰, 等. 塔中北坡顺南地区走滑断裂样式、变形机理即石油地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(12): 2315–2323.
Zhen Sujing, Tang Liangjie, Li Zongjie, et al. The characteristic, formation and petroleum significance of the strike-slip fault system in Shunnan area, northern slope of Tazhong uplift [J]. *Nature Gas Geoscience*, 2015, 26(12): 2315–2323.
- [11] 邬光辉, 杨海军, 屈泰来, 等. 塔里木盆地塔中隆起断裂系统特征及其对海相碳酸盐岩油气的控制作用[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 793–805.
Wu Guanghui, Yang Haijun, Qu Tailai, et al. The fault system characteristics and its controlling roles on marine carbonate hydrocarbon in the Central Uplift, Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 793–805.
- [12] 兰晓东, 吕修祥, 朱炎铭, 等. 走滑断裂与盖层复合成藏模式——以塔中东部中古51井区鹰山组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(1): 107–115.
Lan Xiaodong, Lv Xiuxiang, Zhu Yanming, et al. Hydrocarbon accumulation pattern jointly controlled by strike-slip faults and cap rocks: A case from Yingshan Formation in well ZG-51 block of eastern Tazhong area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(1): 107–115.
- [13] 李传新, 贾承造, 李本亮, 等. 塔里木盆地塔中低凸起北斜坡古生代断裂展布与构造演化[J]. *地质学报*, 2009, 83(8): 1065–1073.
Li Chuanxin, Jia Chengzao, Li Benliang, et al. Distribution and tectonic evolution of the paleozoic fault system, the North Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(8): 1065–1073.
- [14] 李曰俊, 吴根耀, 孟庆龙, 等. 塔里木盆地中央地区的断裂系统: 几何学、运动学和动力学背景[J]. *地质科学*, 2008, 43(1): 82–118.
Li Yuejun, Wu Genyao, Meng Qinglong, et al. Fault systems in central area of the Tarim Basin: geometry, kinematics and dynamic settings [J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 2008, 43(1): 82–118.
- [15] McClay K R, White M. Analogue modelling of orthogonal and oblique rifting [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(2): 137–151.
- [16] Klinkmuller M, Schreurs G, Rosenau M, et al. Properties of granular analogue model materials: A community wide survey [J]. *Tectonophysics*, 2016, 684: 23–38.
- [17] 李本亮, 管树巍, 李传新, 等. 塔里木盆地塔中低凸起古构造演化与变形特征[J]. *地质论评*, 2009, 55(44): 521–530.
Li Benliang, Guan Shuwei, Li Chuanxin, et al. Paleo-tectonic evolution and deformation features of the lower uplift in the central Tarim Basin [J]. *Geological Review*, 2009, 55(44): 521–530.
- [18] 张振生, 李明杰, 刘社平. 塔中低凸起的形成和演化[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(1): 28–31.
Zhang Zhensheng, Li Mingjie, Liu Sheping. Generation and evolution of Tazhong low uplift [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(1): 28–31.
- [19] 余一欣, 黄太柱, 汤良杰, 等. 塔里木盆地塔中低凸起内部构造变形特征[J]. *现代地质*, 2010, 24(6): 1029–1034.
Yu Yixin, Huang Taizhu, Tang Liangjie, et al. Internal structural deformation of the Tazhong lower uplift, Tarim Basin [J]. *Geoscience*, 2010, 24(6): 1029–1034.
- [20] 管树巍, 杨海军, 韩剑发, 等. 塔中低凸起的构造属性和解释方法[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(54): 77–786.
Guan Shuwei, Yang Haijun, Han Jianfa, et al. Structural properties and interpretation methods of the Tazhong Low Salient [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(54): 77–786.

(编辑 张玉银)